

地下水を原水とする膜処理の長期運転時の抵抗発現特性

東北大学 学生員○大野 崇
 水道機工 正会員 神保吉次
 東北大学 正会員 後藤光亀

1. はじめに

膜処理は運転管理の容易さと安定性、病原性微生物等の除去などより安全な水の確保に有用であるが、長期運転時の透過流束の維持やファウリング現象の解明、さらに破断時のリスク評価法など、今後水道に膜処理を導入するに当たっての検討すべき課題は多い。本研究は中空糸内圧型クロスフロー式の膜ろ過現象の基礎理論を用い、地下水を取水源とし長期運転を行った実測データをもとに膜ろ過の操作と抵抗発現に関して基礎的検討を行ったものである。

2. 膜ろ過基礎式

内圧型クロスフロー式の中空糸膜を考え、水の流れを層流とし、整理すると次式を得る。¹⁾

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{32\mu}{\rho g D^2} v \quad \dots (1)$$

また、膜長 dx 間で減少する中空糸内流量は膜外部へ流出する透過水量と等しいとすると、次式を得る。¹⁾

$$\frac{dv}{dx} = \frac{4D\mu}{D^2} \quad \dots (2)$$

一方、膜透過流束はケーキろ過理論より次式で表わされる。

$$u = \frac{P - P_0}{\mu R} \quad \dots (3)$$

ここで、 x ：膜始端からの距離(m)、 P ： x 点における膜内の圧力(Pa)、 v ： x 点におけるクロスフロー流速(m/s)、 D ：中空糸内径(m)、 g ：重力加速度(m/s²)、 ρ ：水の密度(kg/m³)、 μ ：水の粘性係数(kg/m/s)、 u ： x 点において膜を通過する流束(m/s)、 D_0 ：中空糸の初期内径(m)、 R ：膜抵抗(1/m)、 P_0 ：膜外の圧力(Pa)

3. 解析方法

解析に当たっての境界条件は、モジュール出口の設定（最大）クロスフロー流速が1 m/s（ただし設定した以上の透過流束が得られる場合は条件に適合する最大値）とし、出口圧力はモジュール出口から循環タンクまでのパイプラインにおける圧力損失分を考慮した。透過流束は1 m/dに固定し、①膜モジュール長さ(0.01~10 m) ②バージン膜抵抗(10¹¹~10¹⁴ 1/m)を変数として膜ろ過の抵抗発現特性に関する基礎的検討を行った。

4. 結果及び考察

4.1. バージン膜における抵抗発現特性

図-1~2は、精密ろ過膜からナノろ過膜までのバージン膜の初期抵抗を想定し、ファウリング物質のない清水を内圧型のクロスフロー式で膜ろ過を行った場合の計算結果である。

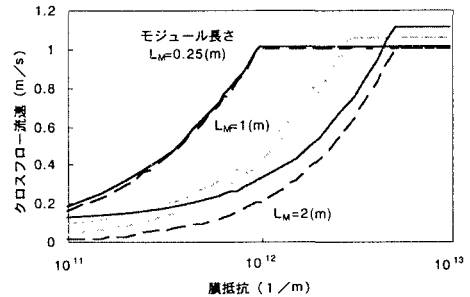


図-1 膜抵抗とクロスフロー流速の関係
 (実線：入口、点線：出口)

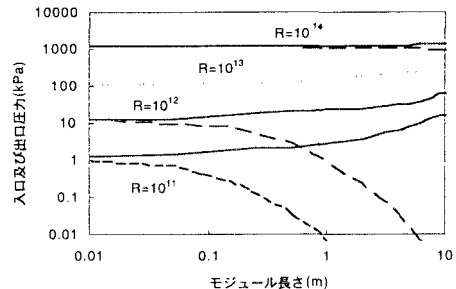
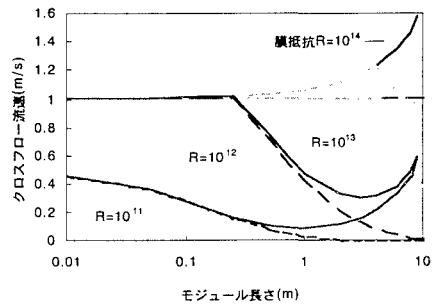


図-2 モジュール長さ、クロスフロー流速
 及びモジュール入口と出口の圧力関係
 (実線：入口、点線：出口)

図-1より膜の初期抵抗が小さい場合、1 m/dの透過流速を得るためにモジュール内に水をクロスフローで送ると、設定したクロスフロー流速である1 m/sよりも小さい値でないと操作が困難である。またモジュール長さが長くなるほど、より大きな膜抵抗でなければ設定されたクロスフロー流速(1m/s)に到達しないことがわかる。

図-2において出口クロスフロー流速はモジュール長さが増加するとゼロ付近に漸近して行く。また入口流速と出口流速の差は連続の式よりモジュール長さに比例して大きくなって行く。この2つの現象がモジュール長さによって入口クロスフロー流速に最小値を生じさせることとなる。この結果は膜の長さを決定する上で重要な知見を与えるものである。

一方、モジュール長さとの関係を見ると、モジュール長さの増加により差圧は当然増加するが、クロスフロー流速が小さくなる場合、単位モジュール長さ当たりの差圧も小さくなり効率的な運転が可能になる。膜抵抗が 10^2 1/mの場合、入口のクロスフロー流速が小さくなるモジュール長さは2~4mであるが、モジュール長さ当たりの圧力損失はそれよりも長い場合に生じる。しかし、浄水操作上の取り扱いの問題もあり、1~2m程度のモジュール長さが現実的と考える。

4.2. 地下水を用いた膜処理長期運転データ

本実験の原水は地下100m下で溶存態のFe約5 mg/l, Mn約0.5 mg/lを含む地下水で、 Cl_2 及び空気曝気を用いて酸化し、中空糸内圧型クロスフロー方式でUF膜でろ過を行ったものである。図-3、図-4にそれぞれ Cl_2 及び空気酸化の場合で運転開始直後から10日間の運転状況を示す。

本実験で用いたモジュール長さは約25cmであるので、モジュール長さからすると設定膜透過流速に対してクロスフロー流速は大きく設定すべき長さの領域である。しかしながら塩素酸化の場合、FeやMnの懸濁態の金属酸化物は長期運転後の電顕写真でもクロスフロー方式では中空糸内に蓄積しにくいことが分かっている²⁾。特に膜ろ過初期には、設定されたクロスフロー流速(約0.5m/s)より小さい値で十分透過流速が確保できている。このとき、全抵抗(膜自身とケーキ及びファウリング物質等を加えた抵抗)は約 5×10^2 1/m程度で、入口及び出口の圧力の上昇も極めて小さい値で安定している。

一方、空気酸化の場合の電顕写真ではモジュール内に懸濁態の金属酸化物が蓄積され、これらの剥離や集積が繰り返されるものと推察される。このとき、全抵抗は $7 \times 10^2 \sim 1.4 \times 10^3$ 1/mの範囲で変動している。塩素酸化と同時に開始したにもかかわらずクロスフロー流速も大きく、入口と出口の圧力の差も極めて大きい。また、この差圧上昇とクロスフロー流速の低下及び差圧の減少とクロスフロー流速の上昇は、前述した金属酸化物が中空糸内で集積と剥離を繰り返していることを示唆し

ている。すなわち、本実験のように多量の金属酸化物を含む水を膜処理する場合、酸化剤の種類によって形成される微小コロイド粒子はその集塊する能力が異なることにより、中空糸内での集積・剥離状況が異なり、結果として循環水をクロスフローさせる圧力の差に大きく影響することが知れる。

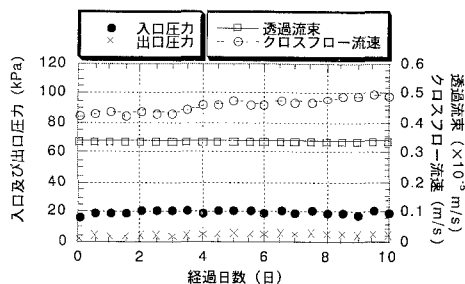


図-3 地下水を原水とする膜ろ過の運転状況 (塩素酸化の場合)

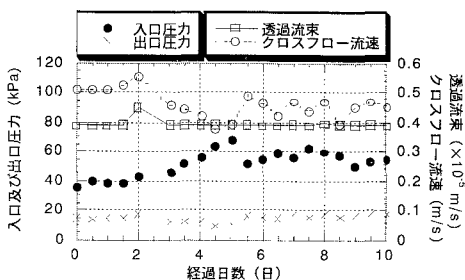


図-4 地下水を原水とする膜ろ過の運転状況 (空気酸化の場合)

5. おわりに

式(1)~(3)による膜ろ過の基礎式の展開は膜抵抗に対し有効な膜モジュール長さを与えるなど有用な情報を与えてくれるが、ケーキ層やファウリング現象を表わすには不十分である。今後、これらの式に汚染物質が入った場合の検討を進めていくことが重要となる。

(参考文献)

- 1) 藤田賢二, 滝沢智: 外圧式中空糸膜における目詰まりの過程のシミュレーションと操作方法の評価, 水道境界雑誌, pp12~23 (1995)
- 2) 後藤光亀, 神保吉次: 高濃度鉄・マンガン含有地下水の連続膜ろ過に関する実験的研究, 環境工学研究論文集 vol. 31, pp161~169 (1994)